Nicht f. d. Austausch

Ueber die Anwendbarkeit der Doppelleitung als Meßinstrument im Bereich der Dezimeterwellen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde genehmigt von der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin

Von WERNER HEMPEL
aus Hangelsberg a. d. Spree

Tag der Promotion: 22. Februar 1937
Tag der mündlichen Prüfung: 25. Juni 1936

831

Referenten:

Professor Dr. A. WEHNELT

Professor Dr. E. SCHUMANN

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

Diese Arbeit erschien in der Zeitschrift

»ELEKTRISCHE NACHRICHTEN-TECHNIK«

Band 14, Heft 1, 1937

Sonderdruck aus „Elektrische Nachrichten-Technik", Bd. 14, 1937, H. 1, S. 33—43
(Verlag von Julius Springer in Berlin W 9)

Über die Anwendbarkeit der Doppelleitung als Meßinstrument im Bereich der Dezimeterwellen.

Von **Werner Hempel**, Hangelsberg a. d. Spree*). DK 538.56.029.6:537.749

A. Einleitung.

Die verschiedenen Meßmethoden.

Zur Messung von Scheinwiderständen im Dezimeterwellenbereich kommen zwei grundsätzlich verschiedene Meßverfahren in Betracht: Die Substitutionsmethode und die Resonanzmethode. Die Substitutionsmethode ist anwendbar, wenn ausreichend genaue Vergleichswiderstände vorhanden sind. Die Resonanzmethode läßt sich auf verschiedene Weise durchführen.

Entweder benutzt man bei fester Kopplung des Resonanzkreises mit dem Sender die Rückwirkung auf den Sender bei Belastung des Resonanzkreises mit dem zu untersuchenden Widerstand (Audionwellenmesser-Methode von Krause [1][1]) oder bei rückwirkungsfreier Kopplung die Größe der Verstimmung des Resonanzkreises und seine Dämpfung, um daraus die Größe des Widerstandes nach Phase und Betrag zu berechnen. Diese Methode, die eine Verallgemeinerung der zweiten Drudeschen Methode [2] zur Messung der Dielektrizitätskonstante und der Leitfähigkeit darstellt, verwendet als Resonanzkreis ausschließlich ein Paralleldrahtsystem und ist vor allem mit den Fehlern behaftet, die durch das Lechersystem selbst hervorgerufen werden. Außerdem sind für beide Methoden im Bereich der Dezimeterwellen größere Fehlerquellen insofern vorhanden, als nur die Möglichkeit besteht, selbsterregte Sender zu verwenden. Deshalb ist die im allgemeinen erforderliche Bedingung der Rückwirkungsfreiheit, also einer konstanten Frequenz und Amplitude, auch bei größter experimenteller Geschicklichkeit und äußerst sorgfältigen Messungen nur schwer zu erfüllen.

Wenn die Anwendungsmöglichkeiten für die Resonanzmethode normalerweise ziemlich beschränkt sind, so läßt sie sich doch für bestimmte Arten von Messungen sehr gut anwenden. Hierfür kommen alle die Messungen in Betracht, bei denen der zu messende Widerstand kleine Abmessungen hat, so daß er sich bequem als Verbindungssteg zwischen den beiden Drähten der Leitung an beliebiger Stelle einschalten läßt.

Problemstellung.

Bei Untersuchungen an einem Lechersystem, das mit einem Versuchskondensator abgeschlossen war, wurde beobachtet, daß sich bei den einzelnen Messungen verschieden große Meßfehler ergaben. Von O. Schmidt [3] wurde bereits bei Versuchen

*) Auszug aus einer Dissertation der Friedrich-Wilhelm-Universität zu Berlin.

[1]) Schrifttum s. S. 43.

mit längeren Wellen festgestellt, daß zu dem am Ende der Leitung befindlichen Meßwiderstand stets ein verschieden großer Strahlungswiderstand hinzukommt. Von E. Roeßler [4] wurde der „Einfluß des Endes" einer Leitung experimentell untersucht; es ergab sich, daß bei stehenden Wellen der Abstand der Knoten oder Bäuche auf der Leitung nicht konstant ist, und auch das Feld zum Ende der Leitung hin Unregelmäßigkeiten aufweist, die auf Strahlung schließen lassen. Daß das Paralleldrahtsystem als Meßeinrichtung praktisch doch nicht die erhoffte allgemeine Anwendung erfahren hat, liegt neben seiner räumlichen Ausdehnung hauptsächlich an den soeben erwähnten Nachteilen, die sich einer genauen Scheinwiderstandsmessung entgegenstellen, wenn auch Vorschläge zu ihrer Beseitigung angegeben wurden.

Gerade bei höheren Frequenzen, wo das Lechersystem eine viel handlichere Form annimmt und sein eigentlicher Verwendungszweck als Meßeinrichtung liegen könnte, treten diese Nachteile besonders in Erscheinung. Deshalb erschien es nicht unwichtig, zu untersuchen, bis zu welcher Genauigkeit sich das Paralleldrahtmeßsystem im Dezimeterwellenbereich verwenden läßt.

B. Die Versuchsanordnung.

Der Hochfrequenzgenerator.

Als Senderohr stand ein in der Bremsfeldschaltung arbeitendes, handelsübliches Telefunkenrohr Typ RS 296 zur Verfügung (Betriebsdaten: 4 V Heizspannung, 400 V Gitterspannung und 50 V negative Anodenspannung). Bei 28 W Heizleistung und 80 W maximaler Gitterleistung wurde eine Schwingleistung von 2 bis 3 W erzeugt. Bei nicht allzu großen Veränderungen der Betriebsdaten war die Wellenlänge der erzeugten Schwingungen veränderbar zwischen 50 und 65 cm.

Zur Vermeidung störender Rückwirkungen war das Lechersystem mit dem Sender sehr lose gekoppelt, beide Teile waren also voneinander getrennt aufgebaut.

Gitter und Anode der Röhre, die als parallele Drähte auf gegenüberliegenden Seiten durch die Glaswand der Röhre nach außen treten, waren auf der Seite des Lechersystems mit einem kleinen Schwingungskreis, auf der entgegengesetzten Seite jedoch nur durch einen größeren veränderbaren Kondensator abgeschlossen. Sämtliche Gleichspannungen wurden der Röhre auf der dem Lechersystem abgewandten Seite zugeführt, wo sich auch die Batterien und Meßinstrumente befanden. Alle Zuführungen waren mit Drosseln versehen und gegeneinander für Hochfrequenz kurzgeschlossen. Mit Ausnahme der Heizleitung waren sie auch praktisch frei von Hochfrequenz. Die in die Heizleitung geschalteten Kurzschlußkondensatoren hatten offenbar einen größeren Widerstand als die Leitung selbst, und wirkungsvolle Drosseln konnten wegen des großen Durchmessers der Heizdrähte nicht hergestellt werden.

Die Abschirmung.

Das Senderohr *S* war zur Abschirmung in einen Drahtkäfig aus engmaschiger Kupfergaze eingeschlossen, der nur an einem Punkt geerdet war. An der Vorderseite war die Abschirmung unterbrochen, um die Durchführung der Drähte zum

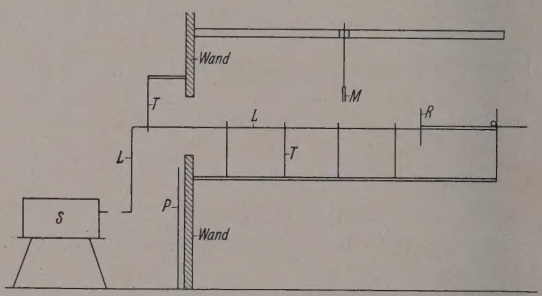

Abb. 1. Schematische Darstellung der Versuchsanordnung.

Schwingkreis zu ermöglichen. Wie aus der Abb. 1 ersichtlich, wurde das Lechersystem *L*, das vom Sender erst senkrecht nach oben und dann in die Horizontale überging, durch eine Fensteröffnung in den Meßraum geführt. Der Knick im Lechersystem war notwendig, damit der Meßraum vor der direkten Strahlung des Senders durch die Metallplatte *P* abgeschirmt werden konnte.

Das Lechersystem.

Das Lechersystem war an der Senderseite mit einer horizontalen Drahtschleife abgeschlossen, die auswechselbar war und bestimmte Verlängerungen der gesamten Leitung für verschiedene Meßbereiche gestattete. Die gesamte Leitungslänge betrug ungefähr 6 m, von denen 1 m auf den senkrechten Teil und 5 m auf den waagerechten entfielen. Das Ende, an dem gemessen wurde, war abgeschlossen durch eine kreisförmige Kupferscheibe *R* von 30 cm Durchmesser, die als Reflektor diente. Sie war mittels Zahnrad

und Zahnstange, mit der ein Maßstab mit Noniusablesung fest verbunden war, über 30 cm verschiebbar.

Das Lechersystem bestand aus 5 mm dicken Messingstäben im Mittelabstand von 20 mm und wurde von sechs 25 cm langen Trolitulstäben T getragen.

Der Meßkreis.

Um größere Meßfehler zu vermeiden, wurde zur Anzeige eine Spannungsmessung gewählt. Ein stark gedämpfter Meßkreis (M), ein kleines Lechersystem, dessen Länge ungefähr $\frac{\lambda}{4}$ betrug, und das senkrecht über der Doppelleitung in veränderbarer Höhe an einem Pertinaxstab von einer Holzleiste herabhing, konnte in konstantem Abstand und parallel zur Doppelleitung bewegt werden.

Der Meßkreis war an seinem unteren, der Doppelleitung nahen Ende offen, während das obere Ende durch ein Vakuumthermoelement abgeschlossen war. Das Vakuumthermoelement war einfachster Art. Es hatte nur zwei Einschmelzungen und bestand aus einem 0,015 mm dicken Eisen- bzw. Konstantandraht. Von hier aus führte eine verdrillte Leitung über Hochfrequenzdrosseln in größerer Entfernung von der Doppelleitung zu einem hochempfindlichen Spiegelgalvanometer. Um zu prüfen, bis zu welchem Grade die Meßkreise selbst die Leitung beeinflussen, wurde der Ausschlag eines Thermoelementes beobachtet, das in einem Spannungsbauch angebracht war, während ein zweiter Meßkreis längs der Leitung verschoben wurde. Das Ergebnis war eine ganz unwesentliche Beeinflussung des Leitungszustandes durch die Meßkreise.

Die Ausführung der Messungen.

Bei den Messungen wurde der zu untersuchende Widerstand in den drittletzten Spannungsbauch der ungefähr 10 Wellenlängen langen Leitung geschaltet. Es kam nun besonders darauf an, den Ort des Spannungsmaximums genau zu bestimmen. Da der Scheinwiderstand einer verlustfreien Leitung an dieser Stelle in Form einer Tangenskurve abfällt, konnte ein Abweichen um mehrere Millimeter bei $\frac{\lambda}{4} = 15$ cm die Messung bereits stark fälschen.

Zu einer genauen Ermittlung des Spannungsbauches führten folgende Überlegungen: Da ein Spannungsbauch mit einem Stromknoten identisch ist, kann die Lecherleitung in einem solchen Punkt durch einen schmalen Spalt unterbrochen sein, ohne daß sich der elektrische Zustand auf ihr verändert. Das bedeutet umgekehrt: wenn ich eine abgestimmte Leitung an einer beliebigen Stelle durch einen schmalen Spalt unterbreche, ist im allgemeinen keine Abstimmung mehr vorhanden. Verschiebt man jedoch diesen Spalt längs der Leitung, so ist die Leitung nur dann abgestimmt, wenn sich der Spalt in einem Stromknoten befindet. Da ferner diese Einstellung sehr kritisch ist, und der Spalt sehr klein gewählt werden kann, ist eine ausreichende Genauigkeit zu erwarten.

Diese Unterbrechung der einen Leitung kann auch gedeutet werden als Kopplung zweier Leitungen, die nur in dem Augenblick in Resonanz

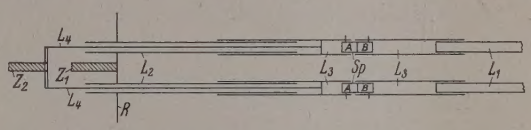

Abb. 2. Ausführung der Lecherleitung zur Ermittlung des Spannungsbauches.

sind, wenn sich das Ende der ersten und damit der Anfang der zweiten Leitung in einem Spannungsbauch befinden.

Die mechanische Ausführung dieses Teils der Doppelleitung ist in Abb. 2 schematisch dargestellt.

Der letzte Teil der Messingstangenleitung ist mit L_1 bezeichnet, ihre Fortsetzung nach einer Unterbrechung von ungefähr 40 cm mit L_2. Sie bestand aus Messingröhren derselben Stärke. Die Unterbrechung war durch 6 mm starke Messingröhren L_3, deren Länge ungefähr 65 cm betrug, überbrückt, welche wiederum bei Sp durch einen schmalen Spalt durchbrochen waren. Hier befand sich in jedem Rohr ein zylindrischer Körper (AB), der die beiden Teile zusammenhielt und zur einen Hälfte (A) aus Messing, zur anderen (B) aus Trolitul bestand. Mit Hilfe eines Bajonettverschlusses ließ er sich in zwei Stellungen bringen, so daß sich einmal unter dem Spalt der Teil aus Messing (die Leitung war nicht unterbrochen) und zum andern der Teil aus Trolitul (die Leitung war unterbrochen) befand. Die Messung wurde nun in der Weise

ausgeführt, daß die Leitung zuerst auf „nicht unterbrochen“ eingestellt und durch Verschieben des Reflektors R mittels der Zahnstange Z_1 auf Resonanz abgestimmt wurde. Als Indikator diente der in einem Spannungsbauch hefindliche Meßkreis. Wurde nun die Leitung auf „unterbrochen“ geschaltet, so ging der Ausschlag des Galvanometers im Meßkreis im allgemeinen auf Null zurück. Mit Hilfe der an L_3 befestigten dünneren Messingröhren L_4, die in einer zweiten verschiebbaren Zahnstange Z_2 endigten, ließ sich der Leitungsteil L_3 und somit auch der Spalt beliebig verschieben. Sobald nun das Galvanometer wieder maximalen Ausschlag zeigte, befand sich der Spalt in dem gesuchten Spannungsbauch.

Darauf wurde der zu untersuchende Widerstand in diesen Spannungsbauch geschaltet, also parallel zu dem dort vorhandenen unendlich großen Blindwiderstand der Leitung. Die dadurch erneut verstimmte Leitung wurde durch Verschieben von R wieder in Resonanz gebracht, nachdem zuvor durch Verbinden der Zahnstangen Z_1 und Z_2 mittels einer Schraubklemme das Leitungsstück L_3 mit dem Reflektor fest verbunden war, so daß der Abstand vom Widerstand zum Reflektor unverändert gleich $\frac{5}{4}\lambda$ blieb.

C. Theoretischer Teil.

Die Lösung der Telegraphengleichung.

Die Lösung der Telegraphengleichung einer mit sinusförmiger Wechselspannung erregten, gleichmäßigen, dämpfungsfreien Doppelleitung ist gegeben durch das Gleichungspaar

$$U_x = U_\xi \cos \alpha x - \mathrm{i} I_\xi Z \sin \alpha x,$$

$$I_x = I_\xi \cos \alpha x - \mathrm{i} \frac{U_\xi}{Z} \sin \alpha x.$$

Hierin bedeuten: U = die Spannung,
I = den Strom,
Z = den Wellenwiderstand,
$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}$ die Phasenkonstante,
x = die Koordinate eines Punktes der Leitung.

Der Punkt ξ der Leitung habe vom Reflektor den konstanten Abstand $(2n+1)\cdot\frac{\lambda}{4}$, für $n = 0, 1, 2 \ldots$, und sei der Anfangspunkt der Koordinate x (Positive Werte von x in Richtung zum Sender). Er befindet sich also stets in einem Spannungsbauch, in dem der Leitungswiderstand unendlich groß ist. Parallel zu diesem unendlich großen Leitungswiderstand wird nun der zu messende komplexe Widerstand geschaltet, durch den die gesamte Leitung in zwei Abschnitte geteilt wird, und zwar möge als erster Abschnitt die Leitung vom Punkt ξ bis zum senderseitigen Ende und als zweiter Abschnitt die Leitung vom Punkt ξ bis zum Reflektor bezeichnet werden. Diese beiden Leitungsabschnitte haben verschiedenartige Spannungsverteilungen, die durch die Bedingung verknüpft sind, daß sie sich am Punkt ξ von beiden Seiten her der Spannung U_ξ nähern und somit einen stetigen Übergang bilden. Die Spannung U_ξ, die von der Phase und dem Realteil des zu messenden komplexen Widerstandes abhängt, ist stets die Amplitude der stehenden Welle des zweiten Leitungsabschnittes, wie aus Abb. 3 zu ersehen ist. Dementsprechend brauchen wir das Gleichungspaar nur auf den ersten Abschnitt anzuwenden.

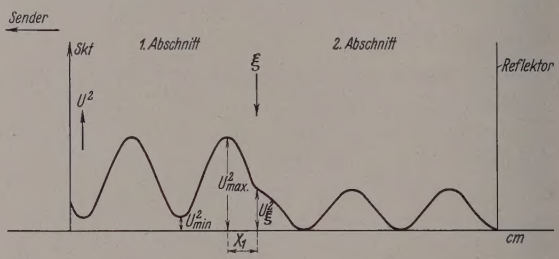

Abb. 3. Die Spannungsverteilung der im Punkte ξ mit einem Widerstand belasteten Doppelleitung.

Der über den Meßwiderstand $\Re$ fließende Strom ist $I_\xi = \frac{U_\xi}{\Re}$,

demnach lautet die Spannungsgleichung

$$U_x = U_\xi \left(\cos \alpha x - \mathrm{i} \frac{Z}{\Re} \sin \alpha x\right), \qquad (1)$$

woraus sich für die absolute Größe des Widerstandes

$$\left|\frac{\Re}{Z}\right| = \left|\frac{U_\xi}{U_{\xi+\frac{\pi}{2}}}\right| = b \qquad (2)$$

ergibt, indem $x = \frac{\pi}{2}$ gesetzt ist.

1. Messung mit Hilfe des Wellenverhältnisses d.

Zur Bestimmung des Widerstandes nach Betrag und Phase steht eine Formel zur Verfügung, welche

in bekannter Weise auf dem Wellenverhältnis $d = \frac{U_{min}}{U_{max}}$ beruht, und deren Ableitung sich bei O. Schmidt findet:

$$\frac{\Re}{Z} = \frac{2 - i\left(\frac{1}{d} - d\right)\sin 2\alpha x_1}{\frac{1}{d} + d + \left(\frac{1}{d} - d\right)\cos 2\alpha x_1}. \quad (3)$$

Der Wellenwiderstand berechnet sich nach der bekannten Formel

$$Z = 120 \cdot \ln \frac{a}{\varrho}\,\Omega,$$

wobei ϱ den Radius und a den Abstand der Leitungsdrähte bedeuten.

Gemessen werden die Spannungsgrößen U_{max} und U_{min} und die Länge x_1, die den Abstand des Punktes ξ von dem benachbarten Extrempunkt der Spannung auf dem ersten Abschnitt bezeichnet, wie aus Abb. 3 zu ersehen ist.

Für die mit reinem Blindwiderstand belastete Leitung ist $U_{min} = 0$ und daher $d = 0$. Für diesen Fall gilt

$$\Re_{blind} = Z \cdot \operatorname{tg} \alpha x_1. \quad (4)$$

Diese Meßweise ist in dem praktisch häufigen Falle, in dem das Meßobjekt nur einen kleinen Wirkwiderstand bzw. -leitwert besitzt, nicht gut anwendbar, da das Wellenverhältnis d dann sehr nahe an Null heranrückt.

2. Messung mit Hilfe des Spannungsverhältnisses b.

Um nun auch im ungünstigen Falle eines sehr kleinen Wirkwiderstandes oder -leitwertes mit größerer Genauigkeit messen zu können, wurde eine zweite Meßweise benutzt, die auf dem Spannungsverhältnis $b = \left|\frac{U_\xi}{U_{\xi+\frac{\pi}{2}}}\right|$ beruht.

Der komplexe Meßwiderstand sei $\Re = R + iX$, so daß Gl. (1) lautet:

$$U_x = U_\xi\left(\cos \alpha x - \frac{iZ}{R + iX}\sin \alpha x\right),$$

dann ist

$$|U_x^2| = \frac{|U_\xi^2|}{2(R^2 + X^2)}$$
$$\cdot [Z^2 + R^2 + X^2 - \{Z^2 - (R^2 + X^2)\}\cos 2\alpha x$$
$$- 2ZX \sin 2\alpha x].$$

Zur Bestimmung der Spannung an den Extrempunkten ergibt die Bedingung $\frac{\partial |U_x^2|}{\partial x} = 0$ die Gleichung

$$\operatorname{tg} 2\alpha x_1 = -\frac{2ZX}{(R^2 + X^2) - Z^2} = \frac{2X}{Z(1 - b^2)}, \quad (5)$$

wo für b die Gl. (2) gilt.

Ist nun der absolute Betrag des Meßwiderstandes $|\Re| = b \cdot Z$ durch Messung des Spannungsverhältnisses $\left|\frac{U_\xi}{U_{\xi+\frac{\pi}{2}}}\right|$ bekannt, so ergibt sich durch Messung der Strecke x_1 die Größe der Blindkomponente zu

$$X = Z \cdot \frac{1 - b^2}{2} \cdot \operatorname{tg} 2\alpha x_1, \quad (6)$$

wodurch der Widerstand bestimmt ist.

Diese zweite Meßweise gestattet also, wenn es sich nicht gerade um einen reinen Wirkwiderstand handelt oder die Blindkomponente fast Null ist, in jedem Fall eine Messung mit guter Genauigkeit, vorausgesetzt, daß das Spannungsverhältnis $b = \left|\frac{U_\xi}{U_{\xi+\frac{\pi}{2}}}\right|$ genau genug gemessen werden kann. Die Spannung U_ξ ist auf dem zweiten Leitungsabschnitt als Extrempunkt gut meßbar, die Spannung $U_{\xi+\frac{\pi}{2}}$, welche nur auf dem ersten Leitungsstück definiert ist, ist nicht als Extremwert meßbar, so daß hierbei ein größerer Fehler zu erwarten ist. Dieser kann jedoch erheblich herabgesetzt werden, wenn man nicht nur die beiden Spannungen getrennt mißt, sondern die Spannung fortlaufend über eine Viertelwellenlänge mißt und aufträgt, so daß möglichst ein Maximum und ein Minimum in der Kurve enthalten ist. Von diesen beiden trägt man dann auf der Abszisse die Strecke x_1 ab und gelangt zu Punkten, über denen dann die entsprechenden Spannungen U_ξ bzw. $U_{\xi+\frac{\pi}{2}}$ abgelesen werden können. Zur Überprüfung der Messung bietet die Spannung U_ξ die Möglichkeit eines Vergleichs mit der Amplitude auf dem zweiten Leitungsabschnitt.

Diese zweite Meßweise kann durch die Messung der Spannung über eine Viertelwellenlänge und Eintragung in eine Kurve zwar befriedigende Meßergebnisse liefern, womit sie ihre Brauchbarkeit erwiesen hat, doch ist sie in der praktischen Ausführung unbequem.

3. Messung mit Hilfe der Extremwerte.

Aus diesem Grunde soll noch eine dritte Meßweise angegeben werden, welche gestattet, die

Spannungsgröße $U_{\xi+\frac{\pi}{2}}$ durch die Extremwerte U_{max}, U_{min} und U_ξ auszudrücken, so daß sich die Aufzeichnung der Spannungskurve erübrigt und der Widerstand bei beliebiger Größe, also auch bei kleinem Wirkwiderstand, noch mit größerer Genauigkeit meßbar ist. Diese dritte Meßweise beruht auf der Voraussetzung, daß

$$U_\xi^2 + U_{\xi+\frac{\pi}{2}}^2 = U_{max}^2 + U_{min}^2 \quad \text{ist.} \qquad (7)$$

Zum Beweise dieser Beziehung entnimmt man Gl. (5), daß zwei benachbarte Extremstellen der Spannung um $\frac{\pi}{2}$ voneinander entfernt sind. Das Verhältnis der Spannung an einem Extrempunkt zu der am Punkt ξ ergibt sich nach Einsetzen der Gl. (5) in die ursprüngliche unter Beachtung der Beziehung

$$b^2 = \frac{R^2 + X^2}{Z^2}$$

zu

$$\frac{U_{extr.}^2}{U_\xi^2} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{1}{b^2} + 1 - \left(\frac{1}{b^2} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\cos 2\alpha x} \right].$$

Für den benachbarten Extrempunkt gilt daher

$$\frac{U_{extr.}^2}{U_\xi^2} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{1}{b^2} + 1 + \left(\frac{1}{b^2} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\cos 2\alpha x} \right],$$

da der cos bei Vergrößerung des Arguments um $2 \cdot \frac{\pi}{2}$ sein Vorzeichen wechselt. Durch Addition beider Gleichungen ergibt sich

$$\frac{U_{max}^2 + U_{min}^2}{U_\xi^2} = \frac{1}{b^2} + 1$$

und unter Beachtung der Gl. (2) die zu beweisende Beziehung (7).

Hiernach erweitert sich die Gleichung (2) zu

$$b = \left| \frac{U_\xi}{U_{\xi+\frac{\pi}{2}}} \right| = \frac{|U_\xi|}{\sqrt{U_{max}^2 + U_{min}^2 - U_\xi^2}}$$

Da nun mit dem Thermoelement stets das Quadrat der Spannungen gemessen wird und auch die Größe b nur quadratisch in (6) enthalten ist, ergibt sich in bequemer Weise die Beziehung

$$b^2 = \frac{U_\xi^2}{U_{\xi+\frac{\pi}{2}}^2} = \frac{U_\xi^2}{U_{max}^2 + U_{min}^2 - U_\xi^2}. \qquad (8)$$

Es möge noch hervorgehoben werden, daß für alle beschriebenen Meßweisen eine genaue Abstimmung der Leitung auf Resonanz nicht erforderlich ist, da in der Ableitung der Formeln diese Bedingung nicht enthalten ist. Da jedoch bei Resonanz die Amplitude ihren Maximalwert annimmt, so daß die Spannungsverhältnisse am besten und genauesten meßbar sind, ist die Bezeichnung »Resonanzmethode« durch die praktische Ausführung der Messung gerechtfertigt.

Fehlerbetrachtung.

Die Eigendämpfung der Leitung ist praktisch, entgegen der Voraussetzung, nicht verschwindend klein, so daß sich bei der Messung der Widerstände hierdurch Fehler ergeben. Die Formeln stellen jedoch sehr gute Näherungsformeln dar. Außerdem tritt bei der Bestimmung von $d = \frac{U_{min}}{U_{max}}$ durch die Dämpfung auf der Strecke von U_{min} bis U_{max} (oder umgekehrt) ein nur äußerst geringer Fehler auf, da die Dämpfung auf dieser kurzen Strecke von $^1/_4$ Wellenlänge praktisch sehr klein ist. Die Größe der Dämpfung ergibt sich nach der Leitungstheorie zu

$$\beta = \frac{R}{2Z} + \frac{GZ}{2}.$$

Der Widerstand der vorhandenen Doppelleitung beträgt unter Berücksichtigung der Stromverdrängung $R = 9{,}6\,\Omega$, während die Ableitung verschwindend klein ist. Da das Lechersystem am Ende praktisch strahlungsfrei ist und die Strahlung an den Unstetigkeitsstellen zu vernachlässigen ist, stellt dieser Widerstand den Gesamtwiderstand der Leitung dar. Bei einem Wellenwiderstand von $Z = 250\,\Omega$ ist also die Dämpfung der gesamten Leitung $\beta = 0{,}02$. Aus demselben Grunde ist der Widerstand des zweiten Leitungsabschnittes, welcher dem zu messenden Widerstand an der Stelle ξ parallel geschaltet ist, nicht unendlich groß, sondern besitzt einen bestimmten endlichen Wert, dessen Größe sich ergibt zu

$$\Re = \frac{\mathfrak{Z}}{\mathfrak{Tg}\,\beta l},$$

da die Länge dieses Leitungsabschnittes ein Vielfaches von $\frac{\lambda}{4}$ beträgt. Da es sich hier um eine sehr kleine Dämpfung handelt, gilt angenähert

$$\Re = \frac{Z}{\beta l}.$$

Die Länge dieses Teiles der Leitung beträgt ungefähr $^1/_8$ der gesamten Leitungslänge, somit ist

$$\Re = \frac{250 \cdot 8}{0{,}02} = 100\,000\,\Omega.$$

Hieraus ergibt sich als obere Grenze des zu messenden Widerstandes bei einem zulässigen Fehler von 1% $\Re = 1000\ \Omega$.

Die der Rechnung zugrunde liegende Gleichmäßigkeit der Leitung ist praktisch bei einer Länge von 6 m meist nur angenähert zu verwirklichen, da die Leitung, die freitragend sein soll, an bestimmten Punkten gelagert sein muß, und sich so entsprechend viele Reflexionsstellen von vornherein ergeben. Darüber hinaus sind bei der hier beschriebenen Leitung durch das verdickte Leitungsstück L_3 (Abb. 2) zwei konstante größere Reflexionsstellen vorhanden. Die Größe des Reflexionsfaktors errechnet sich aus den beiden Wellenwiderständen zu 4,6%.

D. Meßergebnisse.

Die Kopplung des Lechersystems an den Sender.

Bei der Kopplung eines Schwingungskreises mit einem Sender treten bekanntlich ohne besondere Vorsichtsmaßnahmen starke Rückwirkungen auf, die in den Zieherscheinungen beim Abstimmen des Kreises oder Verändern der Senderfrequenz ihren Ausdruck finden. In ganz besonders starkem Maße tritt diese Erscheinung bei Senderöhren der Bremsfeldschaltung in Erscheinung, so daß man sie sogar zur Frequenzvariation dieser Sender nutzbar macht (Gill-Morell). Zur Beseitigung dieser im allgemeinen störenden Rückwirkungen auf den Sender schaltet man bei niedrigeren Frequenzen einen Verstärker als elektrisches Ventil zwischen den Schwingkreis und den Schwingungserzeuger. Bei Frequenzen der Größenordnung $5 \cdot 10^8$ Hz, bei denen eine Verstärkung zur Zeit noch nicht möglich ist, koppelt man fest an den Sender einen abgestimmten, passend gedämpften Zwischenkreis, z. B. ein Lechersystem von einer Wellenlänge, an den man dann entsprechend lose die Meßleitung koppelt. Auf diese Art soll dem Sender stets gleich viel Energie entzogen werden, so daß durch die Energie, die die Meßleitung aufnimmt, der Sender nur um weniges mehr belastet wird. Dieser Zustand konnte nun praktisch leider nicht verwirklicht werden. Es traten auch über diesen Zwischenkreis bei Aufnahme der Resonanzkurve entweder Zieherscheinungen auf oder bei zu loser Kopplung rissen die Schwingungen plötzlich ab.

Darauf wurde der Zwischenkreis ganz entfernt, und so blieb als einziger Weg der der möglichst losen Kopplung der Meßleitung an den Sender. Andererseits durfte die Kopplung eine untere Grenze nicht überschreiten, die durch das noch gerade zulässige Minimum der Energie auf dem Lechersystem bestimmt wurde. Diese untere Grenze wurde durch die Verwendung von Vakuumthermoelementen noch möglichst herabgesetzt. Bei den Messungen betrug der Abstand des Senders vom Lechersystem ungefähr 50 cm.

Bei so loser Kopplung der Leitung, die wie ein großer Vorschaltwiderstand wirkte, war ihre Anfangsspannung sehr belastungsabhängig. Es zeigte sich daher bei den Messungen, daß die Leitung nur dann genügend Energie aufnahm,

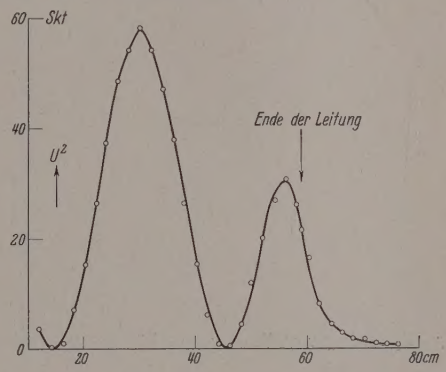

Abb. 4. Spannungsverlauf der am Ende offenen Leitung.

wenn sie durch den Meßwiderstand nur wenig gedämpft wurde. Aus diesem Grunde konnten nur Widerstände mit verhältnismäßig kleinem Realteil bzw. mit kleinem Leitwert gemessen werden.

Der Spannungsverlauf der am Ende offenen Leitung.

Die Spannungsverteilung auf einer am Ende offenen, auf Resonanz abgestimmten Doppelleitung, wie sie nach Messungen in Abb. 4 dargestellt ist, läßt einerseits eine Abwanderung des letzten Spannungsbauches vom Ende fort, andererseits ein Abklingen der Spannungskurve über das Ende hinaus, deutlich erkennen. Unregelmäßigkeiten und Abweichungen von dem zu erwartenden Verlauf, die auf Strahlung der offenen Leitung schließen lassen, sind bereits vor längerer Zeit [4] beobachtet worden.

Die Spannungsverteilung der am Ende abgeschlossenen Leitung.

Daraufhin wurde die Leitung mit Kreisscheiben aus 0,2 mm dickem Kupferblech (sogen. Reflektoren) verschiedener Größe abgeschlossen. Die Größen der Reflektoren waren:

Reflektor A: Durchmesser 4,7 cm,
„ B: „ 10 cm,
„ C: „ 20 cm,
„ D: „ 30 cm.

Die Versuche wurden in der Weise ausgeführt, daß sich die Reflektoren mitten in der Leitung befanden, während das Ende der Doppelleitung durch den üblichen Endreflektor der Größe D abgeschlossen war. Die Spannungsverteilung bei den verschieden großen Reflektoren und bei einer

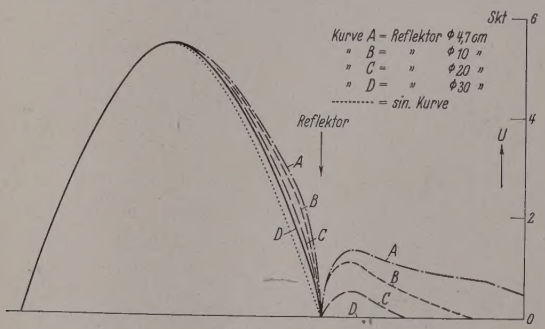

Abb. 5. Spannungsverteilung vor und hinter dem Reflektor.

Wellenlänge von 62 cm zeigt Abb. 5, wobei zu vermerken ist, daß der hinter dem Versuchsreflektor befindliche Teil der Leitung nicht abgestimmt war.

Die oberen Kurven der Abb. 6 stellen die Größe des Spannungsbauches auf der durch die Versuchsreflektoren A, B, C, D abgestimmten Leitung (entsprechend dem ersten Leitungsabschnitt der Abb. 3) in Abhängigkeit von der Länge des dahinter liegenden, also zwischen den Versuchsreflektoren und dem Endreflektor liegenden, zweiten Leitungsabschnittes dar, die unteren Kurven stellen die Größe des Spannungsbauches auf dem zweiten Leitungsabschnitt in Abhängigkeit von seiner Länge dar.

Aus diesen Abbildungen geht klar hervor, daß die Spannungsverteilung am Leitungsende und damit auch die Strahlung von der Größe des Reflektors abhängig ist. Aus diesem Grunde wurde bei allen hier beschriebenen Messungen ein Reflektor (D) verwandt, dessen Durchmesser gleich 30 cm, also ungefähr gleich einer halben Wellenlänge war. Das Lechersystem konnte daher bei den Widerstandsmessungen am Ende als strahlungsfrei angesehen werden.

Die Spannungsverteilung am Orte des Meßwiderstandes.

Von besonderem Interesse ist nun außerdem noch die Spannungsverteilung in der Umgebung der Stelle ξ der mit einem Widerstandsdraht belasteten Leitung. Die Theorie verlangt auf dem

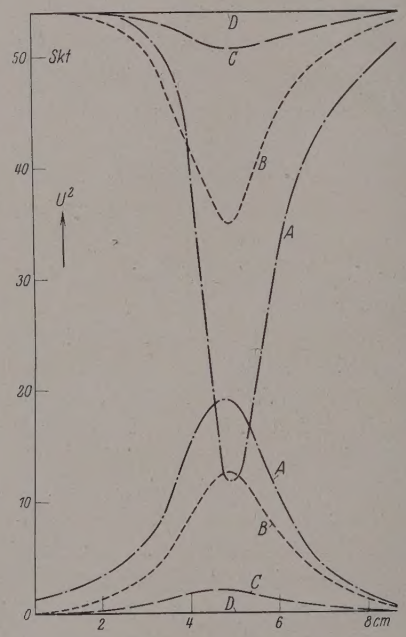

Abb. 6. Die Größe des Spannungsbauches auf dem 1. und 2. Leitungsabschnitt in Abhängigkeit von der Länge des 2. Abschnitts bei verschiedenen Reflektoren.

ersten Leitungsabschnitt eine reguläre sinusförmige Verteilung mit der Amplitude A, und am Ort ξ selbst eine beliebige, von der Größe und Phase des Widerstandes abhängende Spannung U_ξ zwischen 0 und ± A. Auf dem zweiten Abschnitt besteht ebenfalls eine sinusförmige Verteilung, jedoch ist dort die Amplitude gleich U_ξ, da sich an der Stelle ξ stets ein Spannungsbauch befindet. Am Orte ξ selbst findet daher ein stetiger Übergang von der einen Spannungsverteilung in die andere statt, jedoch wird dort gewöhnlich ein Knick in der Kurve zn bemerken sein (vgl. Abb. 3).

Die gemessene Spannungsverteilung in der Umgebung des Punktes ξ ist in Abb. 7 (Belastung

durch einen 0,1 mm starken Manganindraht von $R_\sim = 1\ \Omega$) und Abb. 8 (Belastung durch einen Kondensator) aufgetragen. Wie zu ersehen, weicht sie in beiden Fällen in den entscheidenden Merkmalen von der zu erwartenden Kurve ab, die in Abb. 7 gestrichelt eingetragen ist. Die Amplitude auf dem zweiten Leitungsabschnitt ist nicht gleich U_ξ, sondern beim Widerstandsdraht kleiner und beim Kondensator größer, und in der Kurve für den Widerstandsdraht fehlt der charakteristische Knick, an dessen Stelle ein allmählicher Übergang getreten ist.

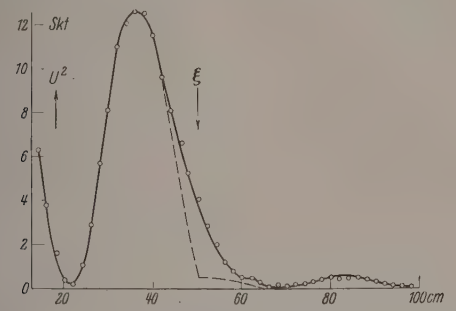

Abb. 7. Die gemessene Spannungsverteilung bei Belastung durch einen Widerstandsdraht.

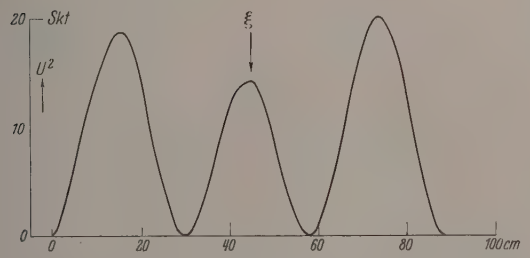

Abb. 8. Die gemessene Spannungsverteilung bei Belastung durch einen Kondensator.

Ergebnis der Widerstandsmessung.

a) Reine Blindwiderstände. Die Messung reiner Blindwiderstände beruhte entsprechend Gl. (4) lediglich auf der Bestimmung der Länge x_1. Als Blindwiderstände dienten kleine Plattenkondensatoren, deren Kapazität mit einer sehr empfindlichen Tonfrequenzmeßbrücke vorher bestimmt war. Als Dielektrikum wurde Trolitul verwandt, welches für die benutzten Frequenzen ein hochwertiger Isolator ist, so daß der parallel liegende Wirkwiderstand als unendlich groß betrachtet werden konnte. Die Meßergebnisse sind in Tafel 1 zusammengestellt.

Tafel 1.

Kondensator	Tonfrequenz-Meßbrücke	Meßsystem bei $\lambda = 62$ cm	Maximale Abweichung
1	1,1 pF	1,06—1,19 pF	8 %
2	2,1 pF	2,01—2,10 pF	4,6 %
3	5,9 pF	6,4 pF	8,4 %
4	7,25 pF	7—8 pF	10 %
5	14,0 pF	17,2 pF	21 %

Die Abweichungen bei größeren Kapazitäten können dadurch erklärt werden, daß sich diese Werte bereits auf dem steilen Ast der zur Berechnung erforderlichen Tangensfunktion befinden. Trotzdem ist zu beachten, daß die gemessenen Werte fast immer zu groß sind, obwohl den Kondensatoren durch Ansetzen eines zylindrischen Ringes am Rand eine äußere Form gegeben war, die eine Streuung der Kraftlinien am Rande nach Möglichkeit verhinderte.

In einer weiteren Meßreihe für Blindwiderstände wurde die Selbstinduktion gerader Drähte in Abhängigkeit von ihrem Durchmesser gemessen. Zum Vergleich wurde die bekannte Formel benutzt:

$$L = 2\,l\,(\ln \frac{2\,l}{r} - 1); \qquad l \gg r$$

(l = Länge, r = Radius des Drahtes).

Abb. 9. Messung der Selbstinduktion gerader Drähte.

Das Meßergebnis, das in Abb. 9 gemeinsam mit der errechneten Kurve dargestellt ist, kann insofern als befriedigend betrachtet werden, als der Gang der beiden Kurven übereinstimmend verläuft, da die Voraussetzung $l \gg r$ kaum erfüllt und auch die Messung durch die Kleinheit der Länge x_1 äußerst kritisch war.

b) Komplexe Widerstände. Es wurde bereits ausgeführt, daß wegen der losen Kopplung überhaupt nur sehr kleine Widerstände bzw. Leitwerte gemessen werden konnten. In Abb. 7 ist als Beispiel die Spannungsverteilung in der Umgebung des Punktes ξ aufgetragen, als der Meßwiderstand aus einem 2 cm langen Manganindraht von 0,1 mm Durchmesser bestand, dessen Wechselstromwiderstand $1\ \Omega$ betrug.

Zur Messung des Spannungsverhältnisses b konnte wegen der Anomalie der Spannungsverteilung in der Umgebung des Punktes ξ die Spannung U_ξ nicht an der eigentlichen Stelle ξ gemessen werden, sondern nur an den homologen Punkten, wobei also die Störung am Punkt ξ als auf diesen Punkt beschränkt angesehen wurde.

Die Messung, die nach der zweiten Meßweise erfolgte, ergab $b^2 = 0{,}04$, und wegen $Z = 230\ \Omega$ betrug $|\Re| = 46\ \Omega$. Die Länge x_1 betrug 14,0 cm. Bei einer Wellenlänge von 62 cm ergab sich demnach gemäß Gl. (6) $X = 34\ \Omega$, also war $R = 31\ \Omega$, d. h. der Widerstand wurde um vieles zu groß gemessen. Dieses Ergebnis ist insofern charakteristisch, als bei fast allen Messungen der Widerstand zu groß gemessen wurde, wenn auch der Fehler verschieden groß war.

E. Kritische Betrachtung der Meßergebnisse.

Der Abstand der Leitungsdrähte.

Aus den vorliegenden Meßergebnissen für komplexe Widerstände wurde nun geschlossen, daß die Störung der Spannungsverteilung am Punkt ξ nicht als auf die unmittelbare Umgebung dieses Punktes beschränkt betrachtet werden dürfe, sondern daß demzufolge die Spannungsverteilung der gesamten Leitung als gestört anzusehen sei.

Eine Ursache für die Abweichung der gemessenen Spannungsverteilung in der Umgebung von ξ gegenüber der theoretisch erwarteten kann darin bestehen, daß der Mittelabstand der Leitungsdrähte mit $a = 0{,}032\,\lambda$ noch zu groß ist. Nach G. Mie [5] wäre dann bereits ein merklicher Verschiebungsstrom parallel den Drähten vorhanden, so daß das elektrische Feld der Leitung nicht mehr einem statischen Feld gleichgesetzt werden kann. Der Verlauf der elektrischen Kraftlinien in diesem Fall ist in Abb. 10a dargestellt, wo die Krümmung der Kraftlinien der Deutlichkeit halber etwas übertrieben gezeichnet ist.

Die Deutung der anormalen Spannungsverteilung am Orte des Meßwiderstandes.

Abb. 10b gibt eine Deutung der anormalen Spannungsverteilung für den Fall, daß die Leitung mit einem Widerstandsdraht belastet ist, also entsprechend der Darstellung in Abb. 7. Der parallel den Drähten verlaufende Verschiebungsstrom verursacht wie oben ausgeführt eine Krümmung der Kraftlinien, welche den Spannungsverlauf in der Umgebung der Stelle ξ stört. Durch die hier nicht dargestellten magnetischen Kraftlinien, welche den Meßwiderstand ringförmig umgeben und entsprechend der Maxwellschen Theorie senkrecht zu den dargestellten elektrischen Kraftlinien verlaufen, wird auch auf dem zweiten Leitungsabschnitt eine zusätzliche Spannung erzeugt, so daß auch dort die Spannungsverteilung gestört ist. Überhaupt tritt bei all diesen Versuchen, wo Anordnungen quer zur

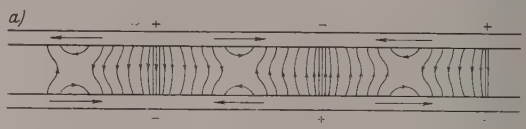

Abb. 10a. Verlauf der elektrischen Kraftlinien stehender Wellen bei zu großem Drahtabstand.

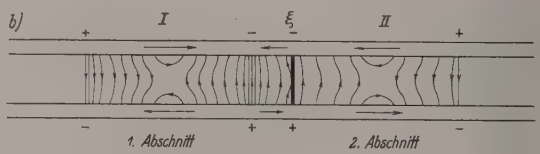

Abb. 10b. Verlauf der elektrischen Kraftlinien der mit einem Widerstandsdraht belasteten Leitung.

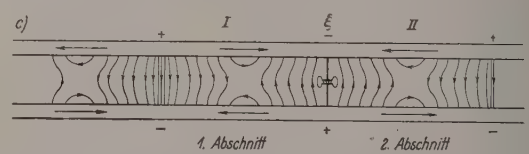

Abb. 10c. Verlauf der elektrischen Kraftlinien der mit einem Kondensator belasteten Leitung.

Leitung geschaltet werden, ein Fehler von grundsätzlicher Bedeutung dadurch auf, daß die Transversalität des Feldes gestört wird; denn diese bildet ja die fundamentale Voraussetzung der Theorie.

Durch Abb. 10c wird die Spannungsabweichung der mit einem Kondensator belasteten Leitung infolge der Randwirkung am Kondensator erklärt, wodurch die Spannung infolge der Krümmung der Kraftlinien verkleinert erscheint, entsprechend der gemessenen Kurve in Abb. 8. Da ferner mit zunehmendem Drahtabstand auch die Strahlung vergrößert wird, besitzt die Leitung eine größere Dämpfung.

Allgemeine Beurteilung der Meßleitung.

Versucht man nun andererseits durch Verkleinern des Drahtabstandes den Voraussetzungen

der Theorie näherzukommen, so darf der Drahtdurchmesser nicht zu klein gewählt werden, da in diesem Fall die Dämpfung zu sehr ansteigen würde.

Ein nicht allzu langes Lechersystem aus Messingstäben, dessen Drahtabstand $a = 0{,}01 \cdot \lambda = 6$ mm und dessen Drahtdurchmesser $2r = 2$ mm beträgt, besitzt bei einer Wellenlänge von $\lambda = 62$ cm eine noch erträgliche Dämpfung $\beta = 0{,}009$ für 1 m Leitungslänge. Diese Leitung würde jedoch viel empfindlicher gegen Störungen in der Gleichmäßigkeit des Drahtabstandes oder -durchmessers sein. So beträgt z. B. der Reflexionsfaktor an einer Stoßstelle mit einem nur 0,5 mm dickeren Draht wegen des kleineren Wellenwiderstandes bereits 6,7%.

Abschließend kann nach den vorliegenden Ergebnissen über die Doppelleitung als Meßinstrument in dem betrachteten Frequenzbereich gesagt werden, daß sie erst dann größere praktische Bedeutung erlangen könnte, wenn ein Sender von größeren Leistungen zur Verfügung stehen würde, so daß die Rückwirkung auch bei nicht zu loser Kopplung wirksam unterbunden werden kann. In diesem Falle würde die Doppelleitung trotz günstigster Abmessungen noch immer eine Anzahl Fehlerquellen besitzen.

Zusammenfassung.

Es wird der Aufbau eines Paralleldrahtmeßsystems zur Messung von Scheinwiderständen im Bereich der Dezimeterwellen beschrieben, mit dem die Anwendbarkeit der Resonanzmethode im genannten Frequenzbereich untersucht wurde.

Neben einer bekannten Meßweise werden noch zwei weitere beschrieben, für die die nötigen Formeln abgeleitet werden, so daß auch Widerstände von kleinem Wirkwiderstand bzw. -leitwert mit genügender Genauigkeit gemessen werden können. Die Messungen ergeben, daß bei dem hier benutzten Senderohr in der Bremsfeldschaltung bei nicht zu loser Kopplung die Rückwirkung auf den Sender zu groß ist. Andererseits wirkt die sehr lose Kopplung der Leitung wie ein großer Vorschaltwiderstand, so daß sie bei Belastung mit einem Wirkwiderstand von der Größenordnung des Wellenwiderstandes überhaupt keine Energie mehr aufnimmt, so daß nur Widerstände gemessen werden können, die die Leitung nur wenig dämpfen. Die Messung reiner Blindwiderstände gelingt im allgemeinen mit befriedigender Genauigkeit, jedoch treten bei komplexen Widerständen noch erhebliche Fehler auf, deren Hauptgrund wohl in der Störung der Transversalität des Feldes durch den Meßwiderstand liegt.

Die Meßergebnisse bei komplexen Widerständen lassen ferner vermuten, daß bei der vorliegenden Doppelleitung mit niedriger Dämpfung und nicht allzu großen Reflexionen der Mittelabstand der Leitungsdrähte mit $a = 0{,}032\,\lambda$ noch zu groß ist, so daß das elektrische Feld der Leitung nicht mehr einem statischen Feld gleichgesetzt werden kann. An Hand einer Kraftliniendarstellung wird eine Deutung der anormalen Spannungsverteilung am Orte des Meßwiderstandes gegeben.

Aus einer Meßreihe geht hervor, daß der strahlungsfreie Abschluß eines Lechersystems der angegebenen Abmessungen bei einer Wellenlänge von 62 cm durch einen Reflektor gebildet wird, dessen Durchmesser 30 cm, also rd. $\frac{\lambda}{2}$ beträgt. Die Größe des Reflektors ist jedoch ebenfalls vom Drahtabstand abhängig, so daß dieses Ergebnis nicht ohne weiteres verallgemeinert werden kann.

Die vorliegende Arbeit wurde im wesentlichen im Jahre 1935 im Institut für Schwingungsforschung zu Berlin ausgeführt. Der Gesellschaft zur Förderung des Funkwesens e.V., sowie allen Herren, durch deren Unterstützung die Arbeit gefördert wurde, bin ich zu herzlichem Dank verpflichtet.

Schrifttum.

[1] W. Krause, Hochfrequenzmessungen bei 1 m Wellenlänge, Zschr. f. Hochfr. **45**, 128, 1935.

[2] P. Drude, Eine Methode zur Messung der Dielektrizitätskonstante und dielektr. Absorption kleiner Substanzmengen vermittels el. Drahtwellen, Wied. Ann. **61**, 466, 1897.

[3] O. Schmidt, Das Paralleldrahtsystem als Meßinstrument in der Kurzwellentechnik, Zschr. f. Hochfr. **41**, 2, 1933.

[4] E. Roeßler, Zur Fortpflanzung el.-magn. Wellen längs Leitern, ENT **7**, 1927.

[5] G. Mie, Elektrische Wellen an 2 parallelen Drähten, Ann. d. Phys. **2**, 201, 1900.

[6] H. Schulz, Theorie des Fernsprechens auf Leitungen, TFT S. 183, 1927.

(Eingegangen am 6. August 1936.)

Lebenslauf.

Ich, Werner Hempel, wurde als Sohn des Schneidermeisters Max Hempel am 30. Dezember 1909 zu Berlin geboren und besuchte daselbst das Dorotheenstädtische Realgymnasium. Zu Ostern 1930 bestand ich die Reifeprüfung mit dem Prädikat „gut“ und bezog anschließend die Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin. Später mußte ich mein Studium aus wirtschaftlichen Gründen unterbrechen und meldete mich freiwillig zum Dienst in der Kriegsmarine, den ich auch nach Wiederaufnahme des Studiums in den Ferien fortsetzte und als Reserve-Offiziers-Anwärter vorläufig mit dem Dienstgrad eines Funkmaaten d. R. abschloß.